

A fúrhatóság és az abrazivitás a kőzetek fontos tulajdonságai az alagút-fúrógépek (TBM) alkalmazásánál

Andráskay Ede

Andraskay Gmbh., andraskay1@bluewin.chi

Horváth Edit Szilvia

BME Építőmérnöki Kar, hesz04@gmail.com

Fábián Miklós

Fábián & Fábián Kft., faban.miklos@t-online.hu

Vásárhelyi Balázs

Vásárhelyi és Tsa. Kft. vasarhelyib@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS: Nagy szilárdságú kőzetek esetén az abban való alagútfúrásnál jelentős költséget eredményez a nagymértékű szerszámkopás. Ebből következik, hogy egy alagút építésnek költségbecslésénél elengedhetetlenül fontos a kőzetanyag ilyen irányú tulajdonságainak ismerete. A cikkben svájci alagútépítési tapasztalatok alapján ismertetjük az ún. Cerchar Indexet, mint az abrazivitás mérőszámát.

Kulcsszavak: abrazivitás, Cerchar index, alagútépítés, Svájc

1 BEVEZETÉS

Az alagúthajtási eljárás kiválasztásánál (robbantásos /konvencionális, vagy gépesített alagúthajtás (TBM között)) nagy jelentősége van a kőzettulajdonságok ismeretének. Ezért szükséges a kőzetmechanikai vizsgálatoknál kőzettípusonként megfelelő laborvizsgálatokat reprezentatív számban előállítani. Ezen ismeretek arra szolgálnak, hogy az alagútfúró gépet előre meg lehessen tervezni, a kivitelezési költségeket ki lehessen kalkulálni, megbecsülni, kockázatelemzést lehessen végezni, és a kopási és tapadási-tulajdonságokat meg lehessen becsülni.

2 TBM-TAPASZTALATOK SVÁJCBAN

1965-től kezdve Svájcban előbb 4 m átmérőig alkalmazták az alagútfúró gépeket (TBM), majd mintegy 5 évvel később már 10 m feletti átmérővel kezdtek végezni TBM-es alagúthajtásokat közúti és vasúti alagutaknál. Az elsők közé tartozott a Svájci Szövetségi Vasutak részére a Heitersberg-tunnel (1970, $\Phi = 10,67\text{m}$), illetve a Svájci Nemzeti Úthálózat Sonnenberg alagútja (1969, $\Phi = 10,46\text{m}$), Luzernben.

Kezdetben a TBM-et „csak” puha, illetve legfeljebb közép-kemény kőzeteknél alkalmazták, amelyek, Jura-hegységben a nyugati Svájcban, illetve a Mittelland (Középső Svájc) molassz kőzeteiben. Puha talajok közé tartozik a márga, pala(kő), melyek nyomószilárdsága 20 N/mm^2 -t nem éri el. A közép-kemény kőzeteknél, mint például homokkő, pala, mészkő, a nyomószilárdság kisebb, mint 100 N/mm^2 .

Az Alpok kemény kristályos kőzeteinél eleinte csak 5,0 m alatti átmérővel mertek TBM-mel vágatokat hajtani. Először a két vasúti alagútnál, a Lötschberg és Gotthard alagutaknál alkalmaztak 2000-től TBM-et $\Phi = 8,80\text{-}9,40\text{ m}$ átmérővel az Alpok kemény kőzeteiben. Az ezen a területen található gneisz, gránit, és mészkő kőzetek 80 N/mm^2 feletti nyomószilárdság értékeket mutatnak. A TBM-mel kapcsolatos tapasztalatok egyértelműen kedvezőek, de egyes szakaszokon leküzdhető (kezelhető) nehézségek léptek fel (nagymértékű szerszám-, vésőkorong- és fúrófejkopás, nem állékony homloklal, túl nagy konvergenciák, nagy/nehezebb biztosítás).

Az elmúlt 40 évben Svájcban ca. 450 km tárt és közúti alagutat készítettek TBM-mel, melyek eredményeit, tapasztalatait folyamatosan felhasználják az újabb alagutak készítéséhez.

Ez természetesen egy nagyon értékes tapasztalatkincshez vezetett.

3 LEGFONTOSABB KÖZETTULAJDONSÁGOK A TBM ALKALMAZÁSÁNÁL

A fúrési folyamat szempontjából a legfontosabb jellemzők a kőzet szilárdsági tulajdonságai, az abrazivitás, a tagoltság nagysága és kitöltöttsége. A fúrhatóság, illetve a penetráció (a fúróeszköz átlagos behatolási mélysége cm-ben mérve a sziklában a fúrófej egyszeri fordulata esetén) a következőktől függ:

- kőzettípus
- kőzet szilárdsága: egyirányú nyomószilárdság (UCS), húzószilárdság, nyíró-szilárdság, hasító-húzószilárdság (SPZ)
- ásványi anyagtartalom (típus, leírás, keménységi fok, anyaghányad)
- további tulajdonságok: anyagsűrűség, porozitás, duzzadási képesség, szemcse-szövetkötés.

Néhány, Svájcban fontos kőzet jellegzetes adatát az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. táblázat: Néhány kőzet jellemző paraméterei:

Kőzettípus	Nyomószilárdság	Hasító-húzószilárdság	Cerchar-érték
	(UCS) N/mm ²	(SPZ) N/mm ²	(CAI)
Gránit/Kvarcporfir	110	15,4	2,7
Aare-gránit	187	14	4,3
Biotit-gneisz	211	9	2,7
Gneisz	150	7	3,6
Amfibolit	157,6	12,8	2,9
Kvarcit	40	12,3	1,0
Triász dolomit	71,3	4,9	1,2
Quintner mészkő	110,9	6,7	0,5
Dogger mészkő	112,9	8,8	1,7
Liász mészkő	64,0	9,7	2,5
Fillit, Negyedkori pala	56,0	4,8	2,5
Homokkő (Molassz)	50,0		
Márgás homokkő (Molassz)	27,2		
Iszapkő (Molassz)	35,0		
Márga (Molassz)	22,0		

4 FÚRHATÓSÁG / FÚRÁSI OSZTÁLYOK

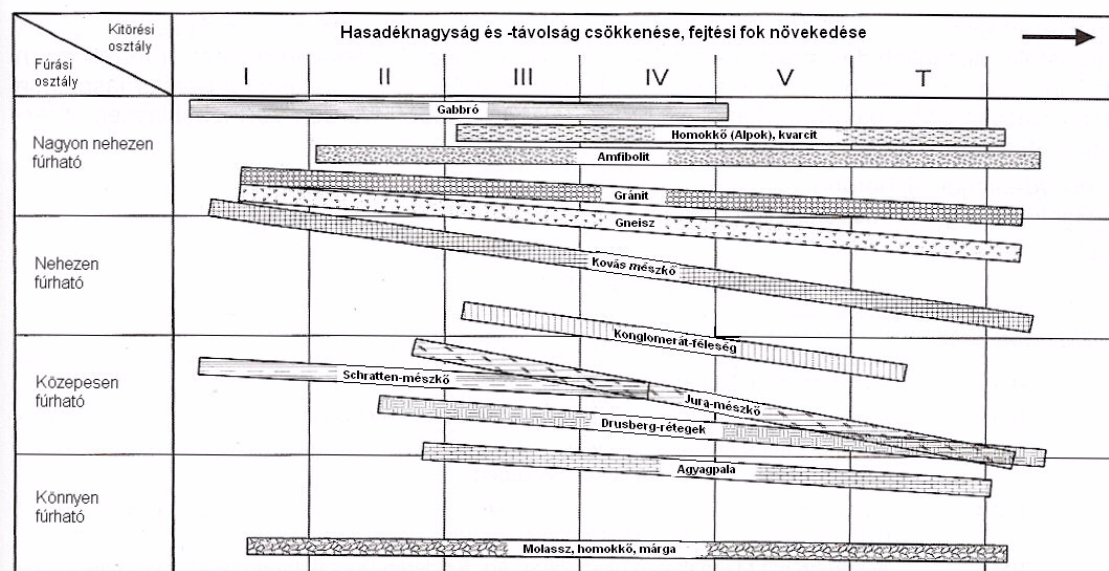
A fúrhatóság adja meg a sziklának a fejthetőségét, amely TBM-mel történik. Az, hogy a szikla könnyen vagy nehezen fúrható (fejthető), legfőképpen a kőzet tulajdonságaitól (lásd 3. pont) és a bevetésre kerülő fúrógép lehetséges penetrációjától függ.

Az alagút fúrógép (TBM) legfontosabb jellemzői a következők:

- a fúrógép és fúrófej típusa és szerkezete
- előretoló-erő és kifeszítő (kitámasztó) erő
- fúrószerszámok/vésőkorongok száma, típusa, átmérője
- TBM meghajtó motorok beépített teljesítménye
- a fúrófej forgatónyomatéka
- fúrófej meghajtási típusa: elektromos meghajtás, elektromos-hidraulikus meghajtás.

A fúrhatóságot a szikla és az alkalmazott TBM közötti kölcsönhatást (interakció) jelenti, ezért erre nem állítható fel abszolút mérték. A fúrési osztályokat a kőzet- vagy képződményjellemzők, illetve a nettó fúrési sebesség alapján tudjuk meghatározni, lásd 1. ábra: Fúrhatósági diagram a geológiai adottságok függvényében.

Egy meghatározott szabványos előretolási vizsgálat alapján a mért penetráció segítségével a fúrógép nettó fúrési sebességét meg lehet határozni, lásd 6. pont.



1. ábra. Fúrhatósági diagram [1]

5 ABRAZIVITÁS

A TBM fejtő eszközei folyamatos kopásnak vannak kitéve. Ezért az eszközök kopásának költsége a beruházási költségek mellett az egyik legfontosabb gazdasági döntési tényezőt jelenti. Kopásnak nevezzük a vésőkorong és a fúrófej felületén történő folyamatos anyagledörzsölődés folyamatát.

Az anyagkopás a következő tényezőktől függ:

- vésőkorong-gyűrű: acélminőség
- közet: nyomószilárdság, kemény ásványok hányada, hasadási foka
- interakció: közet / TBM között, sajtolási nyomás, vésőkorong nyomtávolsága, stb.
- vésőkorong forgási sebessége.

Ahogy a tapasztalatok mutatják, az abrazivitás az üledékes kőzeteknél (kivéve a kemény mészköveknél) nem jelent nagy problémát. Ezzel szemben a vésőkorongok folyamatos kopása a kristályos kőzetekben az alagút-előállítási költségeket jelentősen befolyásolja. Ezért tanácsos az ilyen esetekben már a szerződésben egy külön térítésben az abrazivitás függvényében megállapodni.

A vésőkorongok kopásának a kőzetásványtan és a petrográfia alapján való meghatározására manapság leginkább a Cerchar Abrazivitás Indexet (CAI) használjuk. A CAI-val szerzett egyre több tapasztalat a vállalkozásoknak lehetővé teszi a CAI értékkel összefüggésben a kopást előre kalkulálni.

A CAI-index meghatározása úgy történik, hogy egy karcolási vizsgálat során mérjük, hogy milyen mértékű anyag dörzsölődik le egy szabványos tűvel (acélminőség, terhelés, idő,...) a szabványos mechanikai terhelés hatására történő kísérleti folyamat során. A tű tompasága adja meg a CAI-értéket (lásd 2-3. ábrákat és 2-3. táblázatot). A kísérlet hatszor egymás után a közet szövetének fő irányait figyelembe véve megismétlendő, minden egyes alkalommal új acéltű alkalmazásával. A művelet eredményeképpen létrejövő tűcsúcs-kopást a keletkező csonkakúp körfelületének átmérőjével mérik. Eszerint a Cerchar-abrazivitás-index-skála 0-tól 6 fokig terjed (1 indexfok 0,1 mm csonkakúp átmérőváltozásnak felel meg).

Újabb vizsgálati módszerként jelent meg az LCPC abrazivitási vizsgálat, mely azonban Svájcban kevésbé használatos. A teszt alkalmazhatósága a kőzetanyag ásványi tartalmától is függ. Az így meghatározott értékeket LAK abrazivitás tényezőnek nevezik (lásd 2. táblázatot).

A vizsgálat a következőképpen végezhető el: 500 g tömegű levegőn szárított, 4/6,3 mm frakciójú próbaanyagot egy fémhengerbe helyeznek el, melyben egy 5 x 25 x 50 mm nagyságú, négyzetes fém-szárny 5 percen keresztül 4500 fordulat/perccel forog. A szabványos vizsgálati fém-szárny keménysége Rockwell B60-75-tel adható meg. Az abrazivitás meghatározásához a fém-szárnyat a vizsgálat előtt és után megméri, és eme fém-szárny súlyvesztése a jellemző abrazivitás mértékeként szolgál. A vizsgálatot követően a próbaanyag finomrészenek (< 1,6 mm) meghatározása átszűrővel történik, melynek százalékos aránya a teljes vizsgálatra vonatkozóan a próbaanyag törhetőségi jellemzőjét adja meg.

A Cerchar-vizsgálat előnye:

- széles körű, több évtizedes laboratóriumi és gyakorlati vizsgálatok tapasztalata;

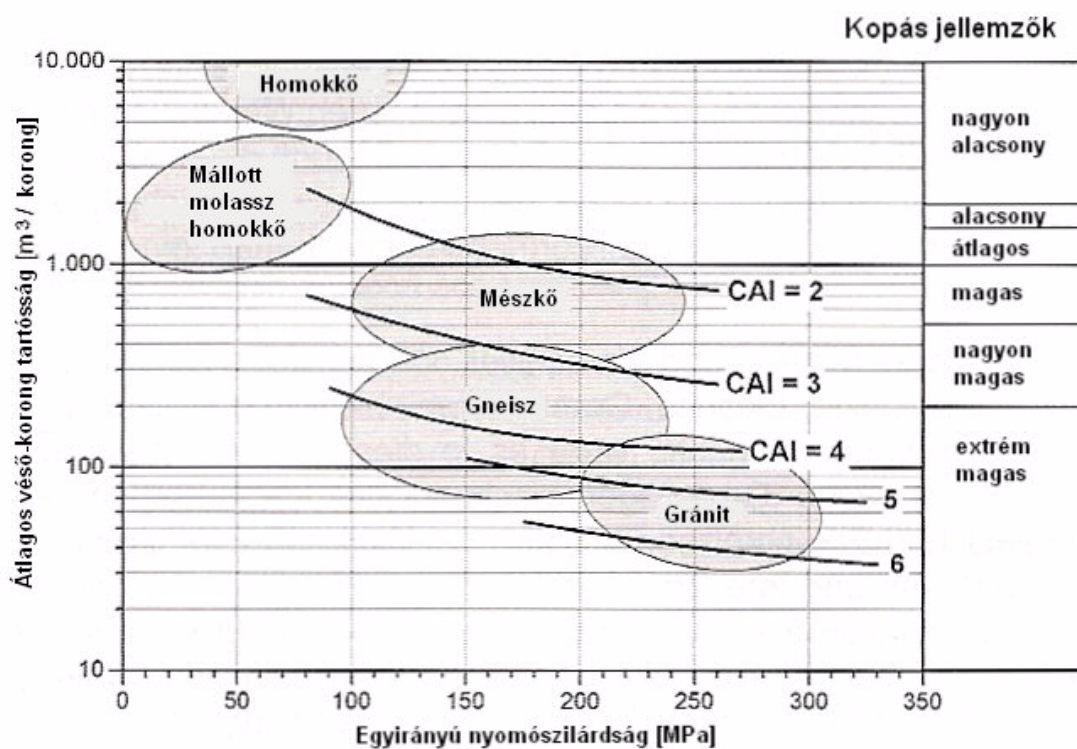
- minimális próbaanyag-mennyiség szükséges, anélkül, hogy roncsolni kellene (ököl-nagyságú darabok);
- a vizsgálati fémcsúcs acélkeménysége a TBM vágótárcsák acélminőségének felel meg;
- a vizsgálati eredmények nem kizárólag az ásványtartalom (pl. kvarctartalom) mutatója, hanem a próbaanyag szilárdságának (keménységének) mértékétől is függ (pl. homokkő cementációs foka);
- a méréseket többször végre lehet hajtani (bizonyítás biztosítási lehetőségei)

Ugyanakkor hátránya, hogy

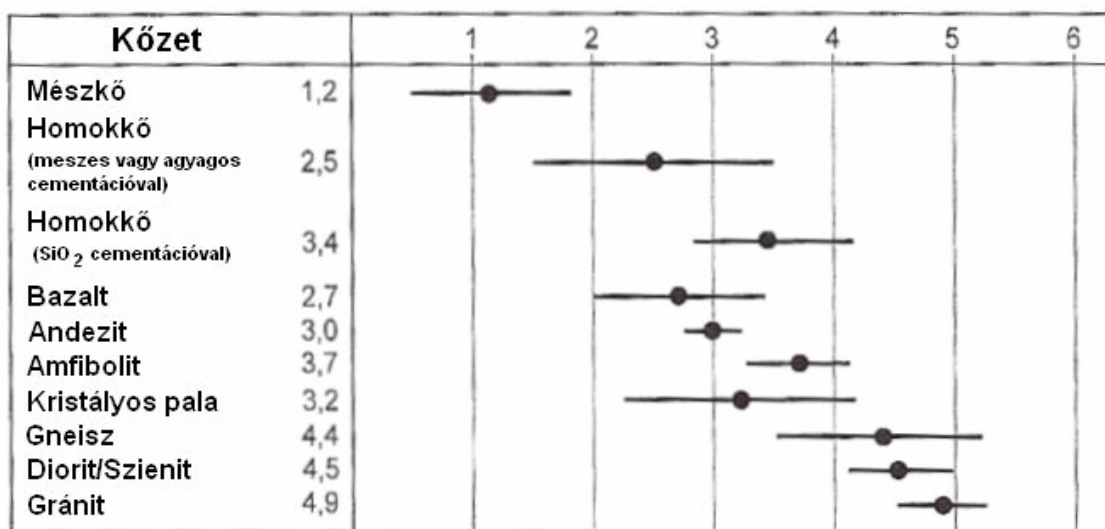
- laza kőzetekre nem lehet alkalmazni;
- durva szemeloszlású próbaanyagoknál a mérőcsúcsok leolvasási értékeinek pontossága az eredmények nagyobb szórásához vezet, így 6 db vizsgálat helyett 12 db szükséges, ahhoz, hogy az egyes értékek leolvasási pontosságának szórása csökkenjen;
- nagyon puha és gyengén abrazív kőzeteknél ($\sigma_c < 10$ MPa) az értékek nem túl különbözőek ($CAI \leq 0,7$);
- erősen inhomogén próbaanyagokat nehezebb vizsgálni.

2. táblázat: Abrazivitás, CAI-index LAK-indexszel való összehasonlítása, példákkal

CAI [0,1 mm]	LAK [gr/t]	Abrazivitás- megnevezés	Szilárd kőzetek megnevezése
0,0 - 0,3	0 - 50	nem abrazív	Fa, tőzeg, szerves szennyeződés
0,3 - 0,5	50 - 100	alig abrazív	Agyag, iszap, márga
0,5 - 1,0	100 - 250	gyengén abrazív	Agyagpala, homokkő (finom szemcsés), mészkő, márvány
1,0 - 2,0	250 - 500	abrazív	Mészkő (homokos), márvány (kvarctartalmú), homokkő (kemény)
2,0 - 4,0	500 - 1250	erősen abrazív	Homokkő, kvarchomokkő, porfír, bazalt, fillit
4,0 - 6,0	1250 - 2000	nagyon erősen abrazív	Gneisz, gránit, amfibolit



2. ábra: Vésőkorong gyűrű tartósság a nyomószilárdság és a CAI-index függvényében [2]



3. ábra Külö nböző kőzetek CAI értékeinek szórása [3]

3. táblázat: Ásványok CAI-indexe

Ásványok	CAI
	[0,1mm]
Kvarc, kvarcit	5,6 - 6,0
Földpát	4,2 - 4,8
Olivin (Mg, Fe)	3,4 - 3,6
Piroxén, piroxénit	3,0 - 3,2
Amfibol, amfibolit	2,8 - 3,2
Szerpentin	1,4 - 1,8
Mésző, dolomit	1,0 - 2,0
Agyag	< 2,5

6 A TBM-ÉS ALAGÚTÉPÍTÉSEK ELSZÁMOLÁSI SZABÁLYOZÁSAI A SVÁJCI ALAGÚTÉPÍTÉSI SZABVÁNY SZERINT (SIA-SZABVÁNYOK)

A TBM-mel történő építés költségeinek megtérítését a következő négy kritérium szerint történik:

- a fejtési és biztosítási osztályok (SK) szerint, a biztosítás beépítési helye és mennyisége függvényében
 - különböző fúrási osztályok szerinti fejtés
 - abrazív kőzeteknél a fúróeszköz kopására vonatkozóan és az emiatti eszközcsere idővesztésének költségmegtérítésére egy kiegészítő költségterítés szükséges
 - biztosítási eszközök típus és (alkalmazási) mód szerint (beépítési helytől független egységár)
- *A fejtés költségeinek megtérítése*

A kitörés és a biztosítás egymást kölcsönösen akadályozzák. A kitörés-árban térítik meg a biztosítási eszközök mennyisége és beépítése általi akadályoztatás költségét. Ezért különböztet meg a SIA Szabvány 118/198 [5] 1-től 5-ig tartó biztosítási osztályokat és az SK T osztályt tübbingek részére.

A kőzeteket fúrási osztályokra, illetve homogén tartományokra kell felosztani. Egy fúrási osztályba olyan alagútszakaszok tartoznak, melyek azonos ráfordítással hajthatók ki.

A fúrási osztályok kritériumai a kiírási tételekben / szerződésben kerülnek rögzítésre.

Ilyen kritériumok lehetnek:

- teljes hosszban egyenlő folyóméterár, azaz egy fúrási osztály
- különböző folyóméterár kőzettípus vagy formáció/képződmény szerint
- különböző folyóméterár penetráció szerint. A penetrációt illetve a nettó fúrási sebességet egy meghatározott előretolási teszttel kell megállapítani.
- különböző folyóméterár egy bizonyos kőzettulajdonság mért értékei alapján.

Szerződésben előre rögzíteni kell a fúrási osztályok helyszíni meghatározási folyamatát és a megkövetelt vizsgálatokat (vizsgálati mód, helyzet/előfordulás, vizsgálatok száma, típusa, stb.)

A fúrási és biztosítási osztályba való besorolást mutatjuk be a 4. táblázatban.

4. táblázat: Biztosítási és fúrási osztályok [5]

Biztosítási osztály	Fúrási osztály		
	X	Y	Z
SK 1	1 X	1 Y	1 Z
SK 2	2 X	2 Y	2 Z
SK 3	3 X	3 Y	3 Z
SK 4	4 X	4 Y	4 Z
SK 5	5 X	5 Y	5 Z
SK T	T X	T Y	T Z

- *Abrazivitás költségeinek megtérítése nagymértékű fúróeszköz-kopás esetén*

Üledékes kőzetekben történő alagúthajtásoknál rendszerint nem lehet külön felárat megtéríteni a magas kopás fejében. A fejtési költség pótlékokat olyan nagymértékű fúróeszköz-kopást okozó extrém abrazív kőzeteknél (pl. kristályos kőzeteknél, pala, stb.) kell megtéríteni, melyeknél az CAI értéke nagyobb, mint 4.

A szabályoknak megfelelően a kopást a CAI-érték mérésével osztályozzuk.

A kiegészítő osztályok ennek megfelelően a következők lehetnek:

Kiegészítő osztályok	CAI-érték
1	4,0 – 4,49
2	4,5 – 4,99
3	5,0 - 6,0

Mind a próbavétel, mind a mértékadó CAI-értékek meghatározása a szerződésben rögzítendő. A 6. fejezetben leírt megtérítési szabályozások alkalmazása Svájcban az elmúlt években jó tapasztalatokat eredményeztek.

IRODALOM

- [1] Schweiz. Baumeisterverband: Richtpreise und Leitungswerte SBV 1988 für mechanischen Vortrieb
- [2] Taschenbuch Tunnelbau 2003
- [3] Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein (2001), B. Maidl at all.
- [4] Norm SIA 198 (2004) Untertagbau Ausführung
- [5] Norm SIA 118/198 (2007) Allgemeine Bedingungen für Untertagbau
- [6] Empfehlung SIA 199 (1998) Erfassen des Gebirges im Untertagbau